

Sur le magnétisme d'une cuirasse bauxitique du Tampoketsa d'Ankazobe

par

R. RÉMIOT* et R. ANDRIAMIRADO**

Résumé

Une cartographie à échelles variées des directions de la composante horizontale des aimantations rémanentes naturelles d'une des cuirasses bauxitiques du Tampoketsa d'Ankazobe (Madagascar) révèle une dispersion de ces directions en chaque point de prélèvement et dans l'ensemble de l'aire étudiée. La dispersion très locale semble s'estomper assez rapidement avec la profondeur.

Summary

A survey using the various scales of the natural remanent magnetizations horizontal component directions on one of the bauxitic cuirasses in the Tampoketsa (Ankazobe-Malagasy Rep.) shows a dispersion of these directions for every sampling point and for the whole area studied. The very local dispersion seems to fade away rather rapidly with the depth.

Kurzzusammenfassung

Ein Kartenzeichnen in verschiedenen Massstäben, welches die Richtungen der waagerechten Komponente von der natürlichen magnetischen Remanenz auf einem der Bauxitschilde des Tampoketsa (Ankazobe-Republik Malagasy) erkennen lässt, zeigt eine Dispersion jener Richtungen in jedem Musterpunkt und in der gesamten studierten Fläche. Die sehr beschränkte Dispersion scheint ziemlich schnell mit der Tiefe zu verschwinden.

* Directeur de Recherches de l'O.R.S.T.O.M. - Centre O.R.S.T.O.M. de Papeete.

** Chargé de Recherches de l'O.R.S.T.O.M. - Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive.

I - INTRODUCTION

A la suite d'une étude magnétique sur les latérites de la bande birrimienne d'Houndé en République voltaïque entreprise par l'un de nous, Jean GOGUEL, Président du Comité Technique de Géophysique de l'O.R.S.T.O.M., a suggéré une cartographie à échelles variées des vecteurs d'aimantation rémanente naturelle mesurée sur des échantillons de cuirasse, ce qui permet de faire ressortir éventuellement leur effet perturbateur en prospection magnétique.

Nous avons été amenés à effectuer des recherches dans ce sens sur l'une des cuirasses du Tampoketsa d'Ankazobe, située à environ 80 km à vol d'oiseau au nord-ouest de Tananarive (Madagascar).

Le terme de Tampoketsa est réservé aux restes de pénéplaines latéritiques presque parfaites (5). La cuirasse, qui a fait l'objet de la présente étude, d'une superficie de 95 000 m², a une épaisseur moyenne de 40 cm. Son altitude moyenne est de 1 600 m, et elle possède une légère pente vers le nord-ouest. Les analyses du Service Géologique de Madagascar ont donné les résultats suivants :

14,0 %	Si O ₂
38,1	Al ₂ O ₃
29,1	Fe ₂ O ₃
2,4	Ti O ₂
16,0	H ₂ O ⁺
....

Le Tampoketsa d'Ankazobe est recouvert d'une steppe herbeuse, mais des lambeaux de forêt primaire sont conservés dans les fonds de vallée et témoignent d'une déforestation récente. Le substratum est formé de granites monzonitiques migmatitiques (1).

Du point de vue géophysique, une telle formation possède l'avantage de ne présenter aucun effet de relief ; on peut alors admettre que les résultats d'une prospection proviennent uniquement de la nature du sous-sol.

II - PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS

Pour donner aux résultats de notre étude une valeur statistique, nous avons jugé indispensable de récolter un grand nombre d'échantillons. Environ neuf cents blocs d'un poids variant de 300 à 5 000 grammes ont été prélevés. Ils sont répartis suivant trois profils orientés respectivement nord-sud, est-ouest, nord-ouest-sud-est magnétique (planche I).

Le long de chaque profil, plusieurs échantillons jointifs constituant un groupe ont été pris. La distance entre deux groupes consécutifs est de 10 ou 20 mètres. Aux points où la direction de la boussole posée sur des blocs voisins accuse une forte dispersion, l'échantillonnage a été étendu aux alentours immédiats. Nous espérons ainsi déterminer l'ampleur du phénomène de mètre en mètre.

Chaque bloc préalablement détaché est remis soigneusement en place. On le coiffe ensuite d'un chapeau de plâtre dont on aura rendu la surface supérieure horizontale. Sur cette dernière, on trace :

- . l'ombre d'un fil à plomb ;
 - . la direction de l'axe de la boussole.
- le premier repère permet de retrouver le Nord géographique.

III - ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE

L'appareil que nous avons utilisé est un inductomètre conçu suivant le principe indiqué par THELLIER, E. (13).

Une méthode rapide de mesure a été adoptée :

Pour déterminer l'angle que fait la composante horizontale M_{xy} du vecteur d'aimantation rémanente naturelle \vec{M} avec le Nord géographique, l'échantillon est placé au centre de l'appareil ; la surface supérieure de plâtre horizontale est tournée vers le haut, et la trace du fil à plomb orientée suivant l'axe des bobines.

Par petites rotations de 5° en 5° de l'échantillon autour d'un axe vertical, on peut orienter la composante M_{xy} suivant l'axe des bobines de l'inductomètre ; on matérialise alors cette direction sur le plâtre.

Cette opération terminée, on retourne l'échantillon de manière à rendre horizontales la trace de M_{xy} et la composante M_z . De ce fait, le vecteur d'aimantation rémanente naturelle \vec{M} se trouve dans un plan horizontal.

Par de nouvelles rotations progressives, on détermine l'inclinaison I , angle du vecteur \vec{M} avec le plan horizontal.

Des mesures de susceptibilité magnétique massique χ sur quelques échantillons ont montré que l'aimantation induite naturelle est faible. Nous reviendrons sur ce point.

IV - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La planche I en annexe donne le plan d'ensemble des profils d'échantillonnage.

Le diagramme de la planche II donne la répartition générale des azimuts de M_{xy} .

Le même mode de présentation est adopté pour l'inclinaison I des vecteurs \vec{M} , comptée positivement suivant la verticale descendante (planche III).

En vue de faire apparaître une éventuelle corrélation entre l'azimut de M_{xy} et de l'inclinaison I de \vec{M} , deux diagrammes de SCHMIDT, l'un pour l'hémisphère supérieur, l'autre pour l'hémisphère inférieur, sont présentés respectivement dans les planches III bis et III ter. Les points représentatifs sont portés sur une sphère indicatrice. On projette cette dernière sur un plan perpendiculaire à la ligne des pôles de façon à respecter l'équivalence des surfaces des compartiments. Ainsi, la densité des points sur les figures planes donne une indication directe sur la fréquence des échantillons.

L'étude des directions privilégiées des azimuts de M_{xy} est consignée dans le diagramme de la planche IV.

En ne prenant que des échantillons, dont l'aimantation rémanente spécifique σ_R (intensité d'aimantation par gramme) est inférieure à un certain seuil, pour l'étude de la distribution des azimuts de M_{xy} , nous obtenons le diagramme de la planche IV bis.

Pour la cartographie de détails (planches V, VI et VII), à chaque point de prélèvement sont portés des vecteurs \vec{V} ayant le sens des M_{xy} mesurés et dont les modules sont les valeurs des aimantations spécifiques σ_R exprimées en 10^{-4} uém cgs. Quant à l'inclinaison, la valeur absolue en dizaines de degrés figure à l'extrémité de chaque vecteur \vec{V} , ($I > 0$ en trait plein, $I < 0$ en trait discontinu).

Les vecteurs \vec{M} des échantillons récoltés en profondeur figurent sur la planche VIII avec les mêmes conventions que sur les planches V, VI et VII.

La planche IX donne les directions moyennes de Mxy suivant les trois principaux profils d'échantillonnage.

La cartographie de la composante Z en des stations distantes de 10 mètres suivant deux axes rectangulaires avec essai de tracé d'isodynmes de Z est visible sur la planche X.

V - ESSAIS D'INTERPRÉTATION

1° — L'examen du diagramme II montre que toutes les directions sont représentées avec toutefois une tendance assez bien marquée vers l'ouest et un net déficit pour le premier quadrant.

Pour mieux faire ressortir les directions privilégiées, nous avons groupé sur un autre diagramme (planche IV) les échantillons présentant les directions communes de Mxy à plus ou moins quinze degrés. Il apparaît alors qu'un quart environ des échantillons se trouve dans le secteur 180°, 240°. Si l'on compare ce résultat à la direction du champ magnétique terrestre actuel (12° W.), on voit apparaître un décalage de plus de $\frac{\pi}{2}$. De plus, une deuxième direction moins nette apparaît dans les 2ème et 4ème quadrants ; peut-on y voir une relation avec la pente actuelle de la cuirasse ?

En étudiant la répartition des σ_R , on trouve les résultats suivants :

Valeur de σ_R		Nombre d'échantillons en tant pour cent
$0 < \sigma_R < 100 \times 10^{-4}$ uém cgs		
100	200	31,5
200	300	21,3
300	400	12,3
400	500	6,8
500	600	6,7
600	700	4,3
700	800	3,0
800	900	2,4
900	1000	1,6
1000	1100	1,4
1100	1200	2,2
1200	1300	1,5
1300	1400	0,8
1400	1500	0,7
1500	1600	0,5
1600	1700	0,6
1700	1800	0,7
1800	1900	0,8
1900	2000	0,5
2000	2800	0,0
		0,4

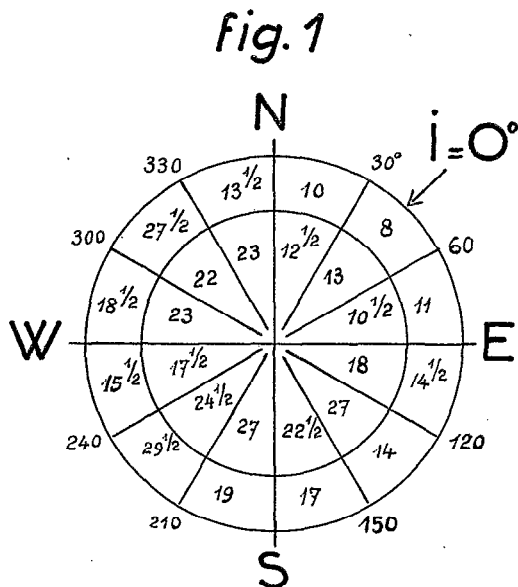
On voit d'après le tableau ci-dessus que 65,1% possèdent une intensité d'aimantation par gramme inférieure à $300 \cdot 10^{-4}$ uém cgs. En groupant ceux-ci dans des secteurs définis comme sur le diagramme de la planche IV, on obtient un nouveau diagramme (planche IV bis) très peu différent du précédent. On peut alors conclure que l'effet prépondérant est dû aux aimantations rémanentes faibles.

2° — En ce qui concerne l'inclinaison, on trouve sensiblement autant de valeurs positives que de valeurs négatives. Le diagramme de la planche III fait ressortir la prédominance des directions de \vec{M} voisines de l'horizontale. Plus du quart des échantillons ont une inclinaison comprise entre -30° et $+30^\circ$. Trois pour cent des échantillons seulement possèdent une inclinaison égale à celle du champ magnétique terrestre actuel.

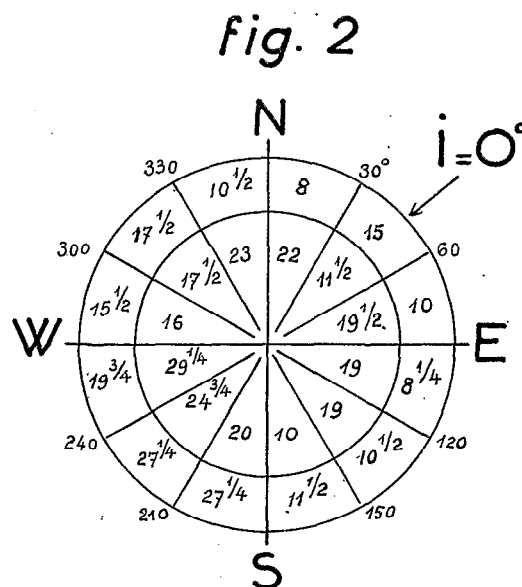
En conclusion, on peut affirmer que l'effet du champ magnétique terrestre actuel sur la direction des aimantations rémanentes naturelles est très faible.

3° — Etudions maintenant la statistique combinée de l'azimut et de l'inclinaison. La comparaison des planches IIIbis et IIIter montre à première vue que dans l'ensemble les échantillons se répartissent un peu partout dans chaque hémisphère. On peut difficilement parler d'une corrélation franche entre l'azimut et l'inclinaison. Un examen plus approfondi des diagrammes révèle certaines zones à densité d'échantillons plus élevée. Comme ces accumulations sont loin d'être massives, on est en droit de se demander si elles sont liées à des phénomènes physiques ou si elles relèvent tout simplement de fluctuations aléatoires.

Dans les planches IIIbis et IIIter, l'unité de surface choisie est le "décadegré carré". Peut-être, en faisant une étude statistique avec un diagramme divisé en compartiments plus grands, verrons-nous apparaître des zones intéressantes ? Partageons la sphère indicatrice en 48 compartiments équivalents limités par des méridiens distants de 30° et les parallèles 0° (équateur), $+30^\circ$ et -30° . Dans chacune des cases ainsi définies, reportons le nombre d'échantillons rencontrés. Si un échantillon se trouve sur un méridien mitoyen ou un parallèle mitoyen, nous l'affectons pour moitié à chacune des deux cases voisines. Quand un échantillon se trouve à l'intersection d'un méridien et d'un parallèle, nous l'affectons pour un quart à chacune des quatre cases environnantes. Avec les conventions ci-dessus, la densité moyenne d'une case lue sur les diagrammes des figures 1 et 2 (projections équivalentes de la moitié boréale et de la moitié australe de la sphère indicatrice sur un plan perpendiculaire à la ligne des pôles) sera un multiple de quarts.



**Densités moyennes
des échantillons à $I > 0$**



**Densités moyennes
des échantillons à $I < 0$**

L'examen de la répartition des densités moyennes sur les figures 1 et 2 appelle trois remarques principales :

a/ Dans les deux hémisphères, en considérant l'ensemble des secteurs, on ne voit apparaître aucune règle générale formelle de distribution de densité en allant du centre des diagrammes vers l'extérieur. Dans sept secteurs, la fréquence des échantillons est plus faible à l'intérieur. C'est le cas contraire dans seize autres secteurs. Dans le secteur restant, il y a égalité entre les deux compartiments.

En vue de tirer éventuellement une loi statistique simple et de pouvoir calculer les limites des fluctuations aléatoires, nous avons utilisé un diagramme cartésien : les axes de coordonnées sont respectivement gradués en azimuts et en sinus de l'inclinaison I . Nous avons obtenu un nuage quasi uniforme de points s'étalant sur toute la portion de plan définie par les droites d'abscisses 0° et 360° d'une part, d'ordonnées 0 et ± 1 d'autre part. Comme pour le mode de représentation sphérique utilisée plus haut, aucune loi significative n'a pu être mise en évidence.

On pourrait interpréter cette absence de corrélation en attribuant aux courants de foudre la part principale de l'aimantation rémanente acquise par les échantillons étudiés. Etant données les valeurs relativement fortes des intensités d'aimantation spécifiques σ_R rencontrées, nous penchons volontiers, comme beaucoup d'auteurs (2, 4, 8, 9, 11 et 12), vers ce mode d'aimantation. Remarquons tout de suite que nos connaissances sur ce phénomène qu'est la foudre sont loin d'être complètement précisées. Selon HAGENGUTH (3), une décharge orageuse est rarement isolée, souvent elle est ramifiée, surtout en zone plate ; de plus, le coup de retour (return stroke), dirigé vers le haut, alors que le coup direct (leader) est dirigé vers le bas, accompagne toujours le coup direct comme le montrent les photographies prises par les caméras ultra rapides.

Dans une étude entreprise par A. ROCHE (10) au Puy Mardou (plateau de Gergovie - France) sur une coulée basaltique, l'auteur signale la présence simultanée de deux anomalies du champ vertical, l'une positive, l'autre négative, distantes de quelques mètres et atteignant quelques dizaines de milliers de gammas (1 gamma = 10^{-5} oersted). Des phénomènes analogues ont été observés par R. CHEVALLIER, E. et O. THELLIER.

En admettant que les deux centres d'anomalie correspondent aux courants de foudre descendant et ascendant, (d'après HAGENGUTH, l'intensité lumineuse peut être considérée comme une mesure de l'amplitude du courant dans le coup de retour et d'après C. MAURAIN (7), le courant de foudre ne pourrait être alternatif), et en se basant sur une vieille notion que la foudre tombe presque verticalement, essayons d'interpréter la diversité des directions rencontrées pour I en donnant au courant de foudre une forme de trajectoire appropriée. Imaginons qu'à partir du point d'impact avec le sol la ligne de courant change rapidement de pente pour devenir horizontale. Au coup de retour, faisons correspondre un schéma symétrique du précédent. Cette façon de représenter les phénomènes se justifierait par le fait que les densités rencontrées dans les deux hémisphères sont tout à fait comparables. D'autre part, rien ne s'oppose théoriquement à la propagation en nappe superficielle que nous avons envisagée et qui est une conséquence normale de l'induction (skin effect).

Malgré la distance relativement faible entre les deux centres d'anomalie décrits par A. ROCHE et étudiés dans la suite par F. RIMBERT (9), on peut dire, vu l'"effet de peau", que dans sa partie souterraine, la trajectoire de la portion horizontale d'un courant de foudre est plus longue que celle de la portion verticale. S'il en était ainsi, on devrait s'attendre à une prédominance d'échantillons à fort module de I . Or, les observations n'ont pas révélé cette propriété. Faut-il alors imaginer pour les portions verticales des lignes de courant des prolongements plus ou moins conséquents dans l'atmosphère ? L'énergie électrique intéressant les aimantations rémanentes horizontales serait alors renforcée et la zone, autour de chaque point d'impact, susceptible de fournir à l'échantillonneur des blocs de cuirasse confortablement aimantés, serait élargie.

Nous avons, dans ce qui précède, supposé implicitement la propagation du courant électrique dans un milieu homogène et isotrope. Dans une cuirasse, ces conditions idéales sont sûrement loin d'être satisfaites et les trajectoires simples que nous avons imaginées peuvent alors se compliquer à chaque discontinuité de conductivité de sorte que des lignes de courant en zig-zag ou ondulées ne doivent pas être exclues des réalités physiques possibles.

b/ Dans tous les secteurs, l'écart de la densité avec la valeur moyenne n'est pas très grand. Pour rendre compte de ce large éventail des azimuts, il faudrait supposer le terrain criblé de coups de foudre dirigés initialement d'une manière tout à fait arbitraire. Signalons que la foudre est un phénomène très fréquent sur les plateaux malgaches.

On peut aussi remarquer que l'absence de polarisation nette dans l'aimantation rémanente étudiée pourrait être attribuée à un remaniement d'une cuirasse antérieure dont l'actuelle serait résultée. A notre connaissance, aucune littérature géologique n'a fait état d'un tel remaniement.

Signalons en passant que les incendies de forêt relatés au premier chapitre ont dû apporter leur contribution aux aimantations rémanentes naturelles que nous avons étudiées, contribution sûrement très faible, vu les très fortes intensités d'aimantation spécifiques rencontrées d'une part, l'incohérence presque totale de distribution des moments rémanents mesurés, quelle que soit l'échelle considérée, d'autre part.

c/ Sur les diagrammes des figures 1 et 2, on retrouve, comme on doit s'y attendre, des densités moyennes relativement fortes dans le troisième quadrant, phénomène déjà signalé dans l'étude des diagrammes des planches IV et IV bis. En prenant comme principal responsable le courant de foudre, on pourrait attribuer cette timide polarisation à une anisotropie sélective du sous-sol en matière de conductibilité électrique.

VI - ÉTUDE DE LA DISPERSION

1° - Échantillons prélevés en surface

Trois groupes d'échantillons ont été choisis pour cette étude.

Groupe 1 (planche V) — Dans le cas présent où la distance moyenne entre échantillons est de l'ordre du mètre, on constate une très grande variation de σ_R . Ce phénomène pourrait s'expliquer soit par une forte concentration de composants magnétiques en un point donné - mais il reste à déterminer quel en serait le mécanisme -, soit par l'effet d'une cause perturbatrice extérieure, par exemple la foudre. Quant aux directions des vecteurs \vec{V} (définis précédemment), elles se répartissent au hasard ; à la rigueur, on pourrait retenir deux directions ENE-WSW d'une part, ESE-WNW d'autre part. Elles correspondent à de fortes intensités d'aimantation rémanente.

Groupe 2 (planche VI) — Comme pour le groupe 1, les points de prélèvement sont distants les uns des autres d'un mètre environ. A chaque point, trois à quatre échantillons jointifs ont été récoltés. La même dispersion tant dans les valeurs de σ_R que dans les directions de M_{xy} est observée. Elle se fait encore plus sentir quand on considère séparément les échantillons d'un même point. On ne peut même plus parler d'une direction privilégiée à forte aimantation.

Par contre, il existe une ligne de séparation nette des inclinaisons orientée grosso modo N-S, dont l'explication pourrait être le passage d'un éventuel courant de foudre.

Groupe 3 (planche VII) — Dans ce groupe, le mode d'échantillonnage est identique au précédent. Dans l'ensemble, les vecteurs \vec{V} possèdent une très forte intensité et une polarisation dans la direction des fortes aimantations SE-NW. Comme dans les deux premiers cas, on observe la même dispersion.

2° - Echantillons prélevés en profondeur

Pour ces échantillons, la distance entre le chapeau de plâtre et la surface topographique actuelle varie entre 20 et 40 centimètres ; l'épaisseur de la cuirasse étudiée ne permet pas des prises plus profondes.

Seulement vingt deux blocs ont été ainsi prélevés. Il est fort regrettable qu'avec les difficultés rencontrées pour leur récolte, nous n'en ayons pu prélever un nombre beaucoup plus grand.

Comme le montre la planche VIII, les directions des composantes horizontales M_{xy} des vecteurs d'aimantation rémanente naturelle présentent en un point de prélèvement moins de dispersion.

Ce fait conduit à émettre l'hypothèse combinée suivante :

- d'une accumulation désordonnée en surface des matériaux plus magnétiques du sol dont l'étude relève plutôt de la pédogenèse, le sol superficiel est rendu ainsi apte à être fortement aimanté,

- et d'une succession de coups de foudre atteignant le sol dans des directions initiales tout à fait arbitraires et produisant dans celui-ci une circulation très superficielle de courants électriques.

Cette hypothèse permet de rendre compte des dispersions observées sur les échantillons prélevés en surface.

On peut voir aussi dans la différence de comportement entre les échantillons de surface et ceux prélevés à une vingtaine de centimètres en dessous, l'influence du feu (6), probable à l'époque de la déforestation (1). Pour notre part, cette influence doit être considérée comme très faible.

3° - Etude des profils

Sur trois profils étudiés, trois à cinq blocs ont été prélevés tous les dix mètres ou tous les vingt mètres. Au total, plus de trois cents échantillons ont été récoltés.

La planche IX donne pour chaque point la direction moyenne de M_{xy} .

Environ treize pour cent seulement des échantillons suivent la direction privilégiée du diagramme général de la planche IV.

4° - Prospection à la B.M.Z.

Un carré de 140 m de côté a été prospecté à la B.M.Z. : l'équidistance des profils orientés N-S magnétique est de 10 m et l'écart entre deux stations voisines est de même valeur.

En certains points anomaux, des mesures tous les mètres ont été effectuées suivant deux directions perpendiculaires. Le gradient de Z suivant ces axes atteint parfois 1200 gammas au mètre, l'appareil étant à 130 cm du sol.

L'impression générale qui se dégage de la lecture des valeurs portées sur les points stationnés de la planche X est la quasi-absence de corrélation entre stations voisines. Voyons si cette impression est bien fondée.

Désignons par i et j les coordonnées d'une station (i croissant de gauche à droite et j de bas en haut).

En calculant les différences :

1°/ $Z_{i,j} - Z_{i-1,j}$	en dizaines de gammas
2°/ $Z_{i,j} - Z_{i,j-1}$	" "
3°/ $Z_{i,j} - Z_{i-1,j-1}$	" "
4°/ $Z_{i,j} - Z_{i+1,j+1}$	" "
5°/ $Z_{i,j} - Z_{i-1,j-2}$	" "
6°/ $Z_{i,j} - Z_{i+1,j-2}$	" "
7°/ $Z_{i,j} - Z_{i-2,j-1}$	" "
8°/ $Z_{i,j} - Z_{i+2,j-1}$	" "

et en les affectant aux points de coordonnées i, j, nous obtenons huit tableaux numérotés respectivement 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, qui permettraient de se rendre compte rapidement, dans le cas favorable, de la valeur moyenne d'un gradient suivant l'une des directions choisies E-W, S-N, SW-NE, NW-SE, et approximativement SSW-NNE, NNW-SSE, WSW-ENE, WNW-ESE, et dans le cas contraire du degré de dispersion.

S'il existe un gradient moyen, variation de Z tous les dix mètres suivant les directions E-W et S-N, on calculera facilement sa valeur en parcourant les lignes du tableau 1 et les colonnes du tableau 2.

De même, la variation de Z tous les $10\sqrt{2}$ mètres suivant les directions SW-NE et NW-SE se déduira encore assez aisément des nombres figurant sur les "diagonales" ascendantes ou descendantes, de gauche à droite sur les tableaux 3 et 4.

La découverte d'un gradient éventuel de Z tous les $10\sqrt{5}$ mètres est plus laborieuse en suivant les nombres inscrits dans les tableaux 5, 6, 7 et 8. Aussi avons-nous consigné, pour notre propre information, dans des tableaux en lignes les valeurs des différences de Z entre deux stations consécutives lues sur une même oblique suivant laquelle nous cherchons à connaître le gradient. Ces tableaux sont numérotés 5 bis, 6 bis, 7 bis et 8 bis.

On ne saurait imposer au lecteur le travail fastidieux de parcourir tous les tableaux que nous avons dressés. Des ensembles de nombres des tableaux 1 à 4 et 5 bis à 8 bis, nous allons tirer huit histogrammes, fidèles traductions graphiques des tableaux, à la différence près que les nombres d'un tableau sont répartis en sous-ensembles ordonnés (qui constituent les divers profils) et que dans chacun de ces sous-ensembles les divers éléments sont également ordonnés, tandis que ces deux propriétés ne sont pas prises en considération ni n'apparaissent sur les histogrammes. Mais étant donnée la très grande dispersion dans chacun des tableaux étudiés, on peut valablement considérer tous ses éléments comme indiscernables, quant à leur place, dans une étude purement statistique.

Les histogrammes sont dessinés à la manière des diagrammes hydrologiques. En abscisses X, sont portés les nombres d'un tableau arrondis à la dizaine ; en ordonnées F, figurent les fréquences correspondantes rencontrées dans le tableau.

Sous chacun des histogrammes numérotés de 1 à 8 qu'on trouvera dans les pages suivantes, nous tracerons une courbe en escalier, analogue à celle de la fonction $y =$ partie entière de x , dont chaque portion de "largeur" égale à 100 gammas sera centrée sur un nombre entier de X de centaines de gammas. Nous éviterons toute extrapolation en nous limitant exclusivement aux valeurs de X auxquelles correspondent des F effectives.

Si, comme nous l'avons admis, la partie principale de l'aimantation de la cuirasse est liée à la foudre, phénomène fort complexe, on peut supposer que les variables aléatoires sont nombreuses de sorte que pour tracer une courbe moyenne, par exemple dans la portion centrale ($-10 < X < 10$), on pourrait se contenter d'un segment de droite parallèle à l'axe des X , segment que nous figurons en pointillé sur le graphique. La répartition serait donc uniforme.

Au contraire, si l'on veut réduire le nombre des variables aléatoires, les courbes moyennes prendront la forme de cloches plus ou moins aplaties présentant toutes une certaine symétrie par rapport à la droite $X = 0$. Ce résultat est en bon accord avec les faits observés en météorologie qu'est la présence du coup de retour en association avec le coup direct.

L'examen des tableaux (non publiés) et des histogrammes incline à conclure à une indépendance quasi totale d'une station à l'autre, que la distance entre elles soit de 10, $10\sqrt{2}$ ou $10\sqrt{5}$ mètres. Ce fait confirme les résultats mentionnés à la fin du chapitre III au sujet de l'étude comparative des aimantations induite et rémanente. Il confirme également les observations sur une cuirasse, d'un autre type, ferrugineuse au lieu d'être bauxitique, étudiée précédemment par l'un d'entre nous.

Toutes choses égales, les valeurs moyennes de F dans la portion centrale des diagrammes ($-10 < X < 10$) sont, dans l'ensemble, très cohérentes : il n'existe donc aucune direction nettement privilégiée.

Si, à la distance du sol à laquelle nous avons effectué les mesures à la B.M.Z. (dans le cas présent, elle est de 1,30 mètre), les valeurs observées sont tout à fait incohérentes à l'échelle décimétrique sur un nombre relativement important de stations, on peut dire que l'effet de l'aimantation induite est mineure devant l'aimantation rémanente. Il est peu concevable d'imaginer une hétérogénéité du terrain, en susceptibilité magnétique, qui permettrait avec le champ inducteur terrestre de l'ordre de 0,5 oersted de produire de telles anomalies.

Nous avons signalé plus haut qu'il nous est arrivé de rencontrer des points distants d'un mètre pour lesquels les valeurs du champ vertical Z diffèrent de plus d'un millier de gammas. Nous pouvons affirmer après cette étude de la dispersion que la valeur de Z mesurée en une station dépend essentiellement de son voisinage le plus immédiat.

Au cours de notre prospection, nous avons essayé de voir à quelle hauteur la dispersion du champ s'estompait suffisamment pour permettre d'utiliser un magnétomètre à protons inutilisable dans notre cas avec la perche d'origine livrée par le constructeur. Pour cela nous avons attaché la bouteille détectrice au bout d'un jeune tronc d'arbre d'environ cinq mètres de long retenu, en station droite, par trois haubans. Malheureusement, le vent très fort qui soufflait dans la région à l'époque de notre campagne n'a pas permis de faire des mesures : aucun signal n'a pu être obtenu.

5° - Etude du gradient vertical de D

En vue de cette étude, cinq stations ont été choisies. En chacune, des mesures de D ont été effectuées à trois hauteurs différentes : 1,00 m, 1,30 m et 1,60 m. Dans le tableau suivant, on trouvera les valeurs de la déclinaison (comptée positivement vers l'est, et l'appareil étant à 1,30 m) et son gradient suivant la verticale ascendante.

	Valeur de D	Gradient vertical
Station 1 : point A	- 12° 20'	+ 3'/dm
Station 2 : à 10 m au sud de A	- 09° 25'	- 15'/dm
Station 3 : à l'extrême sud du profil N-S ..	- 11° 30'	0'/dm
Station 4 : à l'extrême sud-est du profil SE-NW	- 11° 9'	+ 1'/dm
Station 5 : à l'extrême est du profil E-W	- 12° 23'	+ 4'/dm

La deuxième colonne du tableau montre que, dans l'ensemble, la déclinaison magnétique est relativement peu affectée par la présence de la cuirasse.

En examinant les gradients verticaux des stations 1, 4 et 5, on peut penser que la rotation vers l'est de la composante horizontale du champ magnétique terrestre, quand on s'élève, pourrait avoir pour origine la décroissance, avec l'altitude, de la partie principale d'un champ perturbateur orienté sud-ouest comme les composantes privilégiées M_{xy} de la planche IV.

CONCLUSION

En ce qui concerne les directions des aimantations rémanentes naturelles, quelle que soit l'échelle adoptée dans les prises d'échantillons (décimétrique, métrique ou décamétrique), on est loin de rencontrer une certaine homogénéité.

L'étude de la déclinaison magnétique a révélé, comme on doit s'y attendre, que déjà, à un mètre trente du sol, la valeur de D est voisine de la normale avec un gradient vertical faible.

La comparaison entre les intensités d'aimantation rémanente naturelle et les susceptibilités magnétiques massiques mesurées montre que les premières sont nettement plus fortes que les secondes. Or, dans l'interprétation d'une prospection, on a coutume de ne tenir compte que de l'aimantation induite.

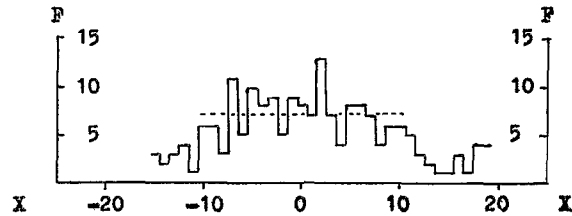
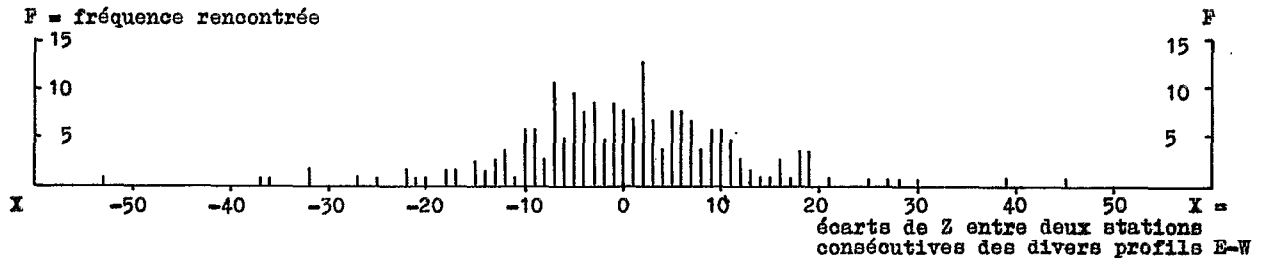
Dans le cas présent, cette façon d'opérer n'est plus valable. Notre prospection à la B.M.Z. a révélé un très fort gradient d'un point à un autre ; la cause doit être recherchée dans les fortes valeurs de σ_R .

Pour l'étude magnétique de formations analogues à la cuirasse qui fait l'objet de cette note, il apparaît donc qu'avant toute interprétation, des mesures d'intensité d'aimantation rémanente et de susceptibilité sont nécessaires.

Sur le terrain, avant de décider d'une campagne définitive, il conviendrait de procéder à des tests permettant de caractériser le degré et l'échelle de la dispersion et voir si la prospection magnétique mérite d'être entreprise.

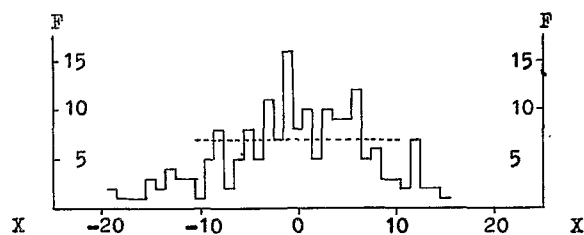
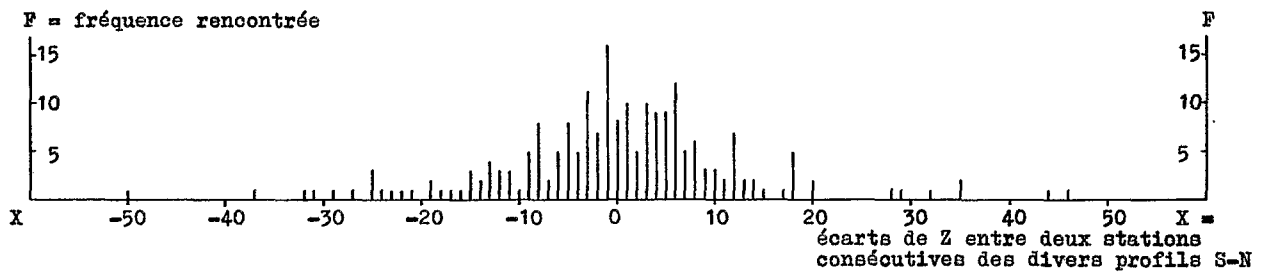
HISTOGRAMME N° 1

Dispersion de Z suivant la direction E - W



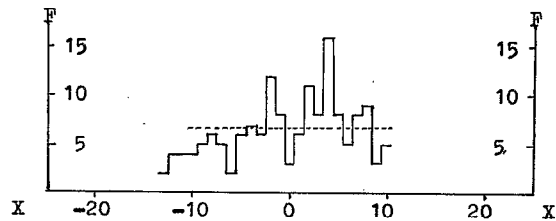
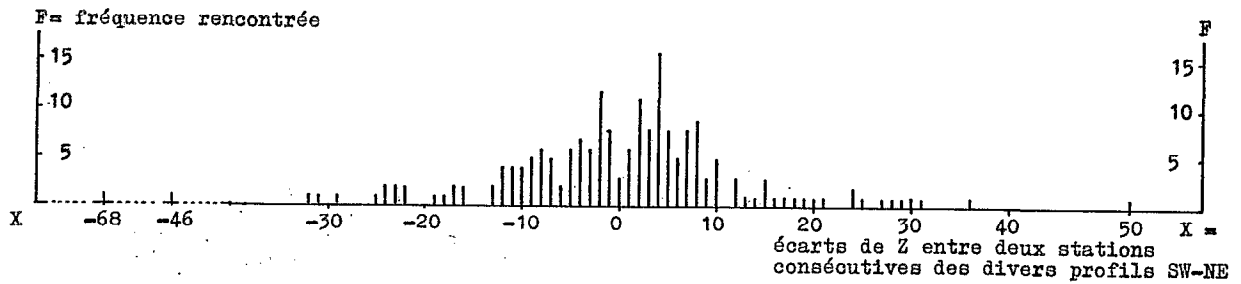
HISTOGRAMME N° 2

Dispersion de Z suivant la direction S - N



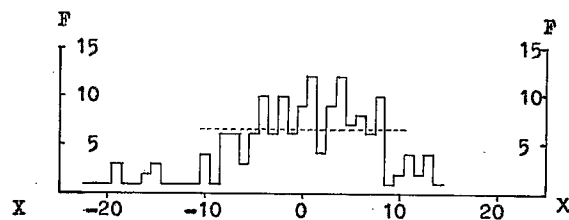
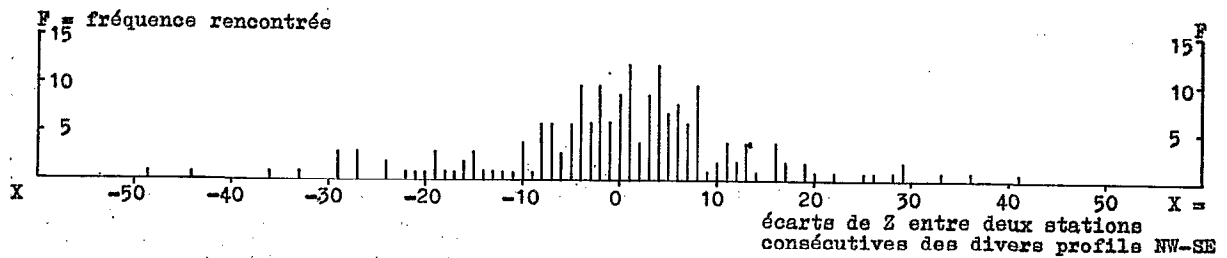
HISTOGRAMME N° 3

Dispersion de Z suivant la direction SW - NE



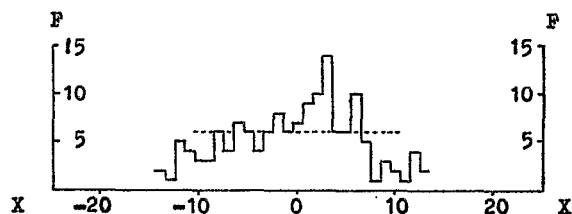
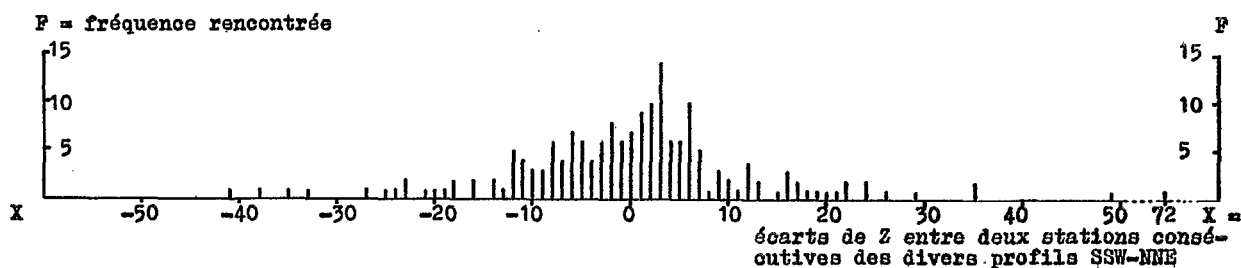
HISTOGRAMME N° 4

Dispersion de Z suivant la direction NW - SE



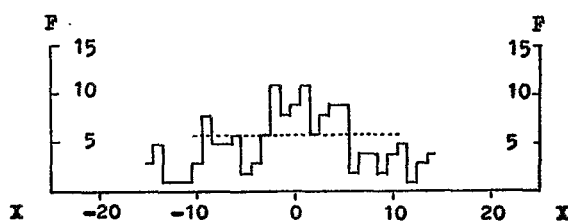
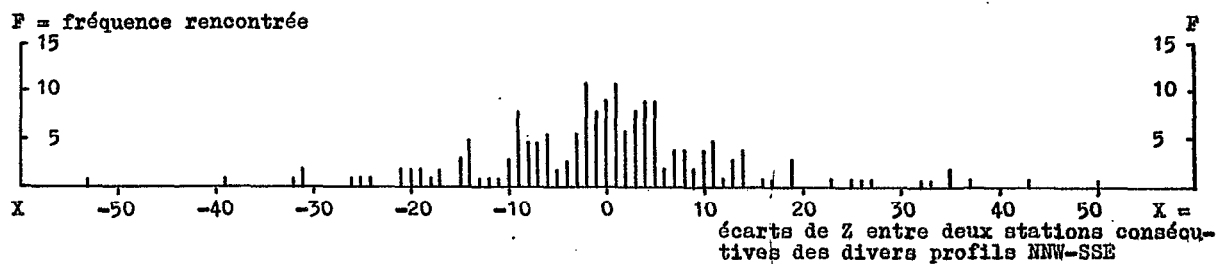
HISTOGRAMME N° 5

Dispersion de Z suivant la direction SSW - NNE



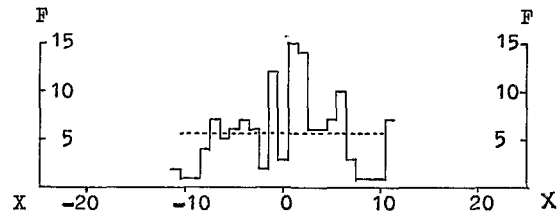
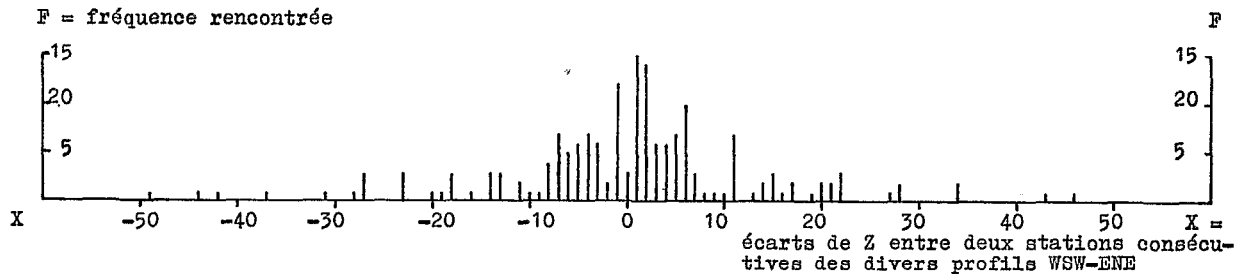
HISTOGRAMME N° 6

Dispersion de Z suivant la direction NNW - SSE



HISTOGRAMME N° 7

Dispersion de Z suivant la direction WSW - ENE



HISTOGRAMME N° 8

Dispersion de Z suivant la direction WNW - ESE

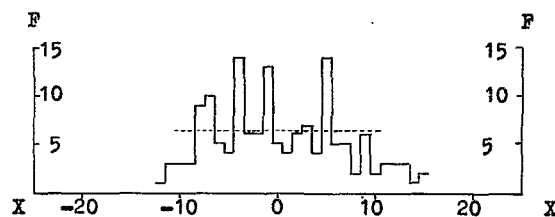
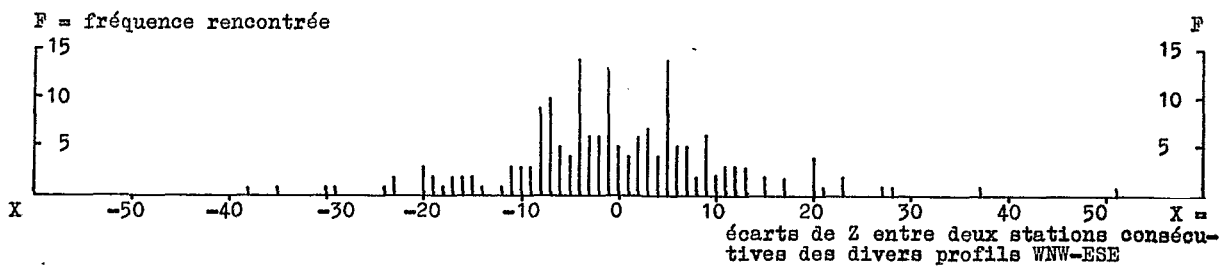
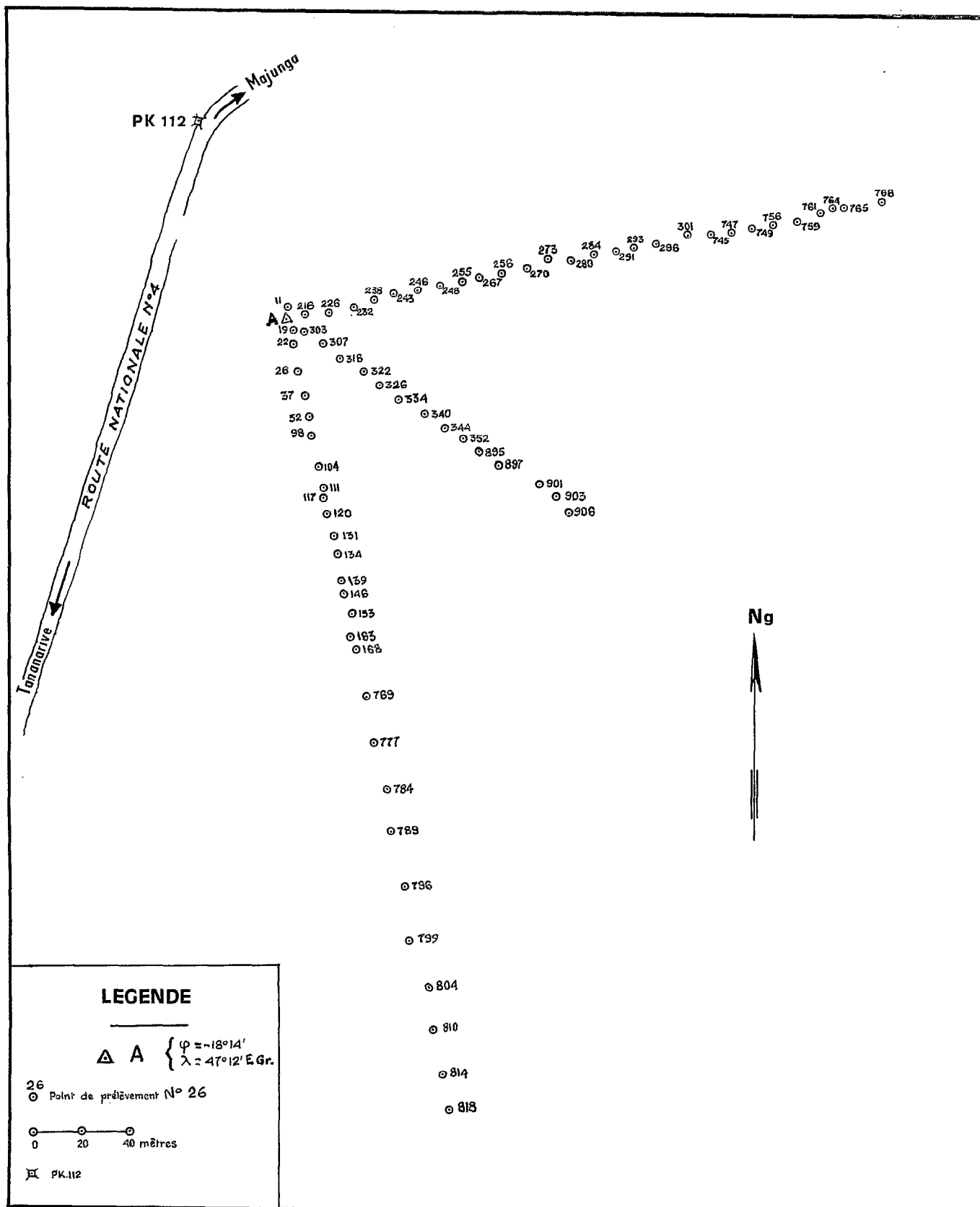


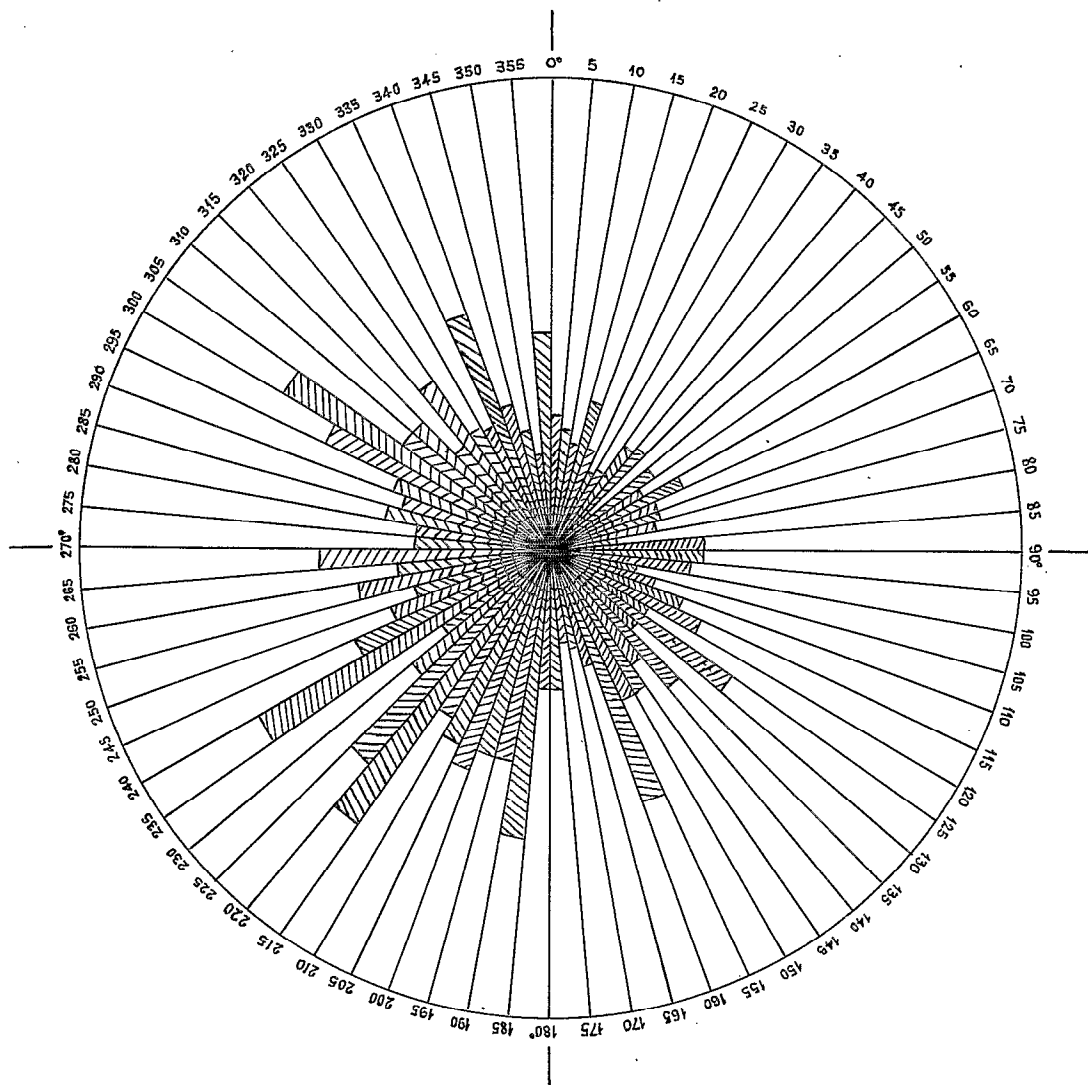
Table des planches en annexe

Planche I	: Plan d'ensemble du site d'échantillonnage
Planche II	: Diagramme de répartition des azimuts de Mxy
Planche III	: Diagramme de répartition des inclinaisons des vecteurs \vec{M}
Planche III bis	: Répartition des échantillons en fonction de l'azimut de Mxy et de l'inclinaison de \vec{M} (échantillons à inclinaison positive)
Planche III ter	: Répartition des échantillons en fonction de l'azimut de Mxy et de l'inclinaison de \vec{M} (échantillons à inclinaison négative)
Planche IV	: Etude de directions privilégiées de Mxy (totalité des échantillons)
Planche IV bis	: Etude de directions privilégiées de Mxy (échantillons à $\sigma_R < 300 \cdot 10^{-4}$ uém cgs)
Planche V	: Cartographie détaillée des directions de Mxy et I du groupe 1 (échantillons en surface)
Planche VI	: Cartographie détaillée des directions de Mxy et I du groupe 2 (échantillons en surface)
Planche VII	: Cartographie détaillée des directions de Mxy et I du groupe 3 (échantillons en surface)
Planche VIII	: Directions de Mxy (échantillons en profondeur)
Planche IX	: Etude des profils : direction moyenne de Mxy
Planche X	: Prospection à la B.M.Z. : isodynmes de Z

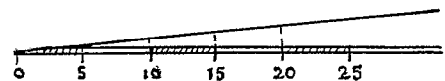
PLAN D'ENSEMBLE DES PROFILS D'ÉCHANTILLONNAGE



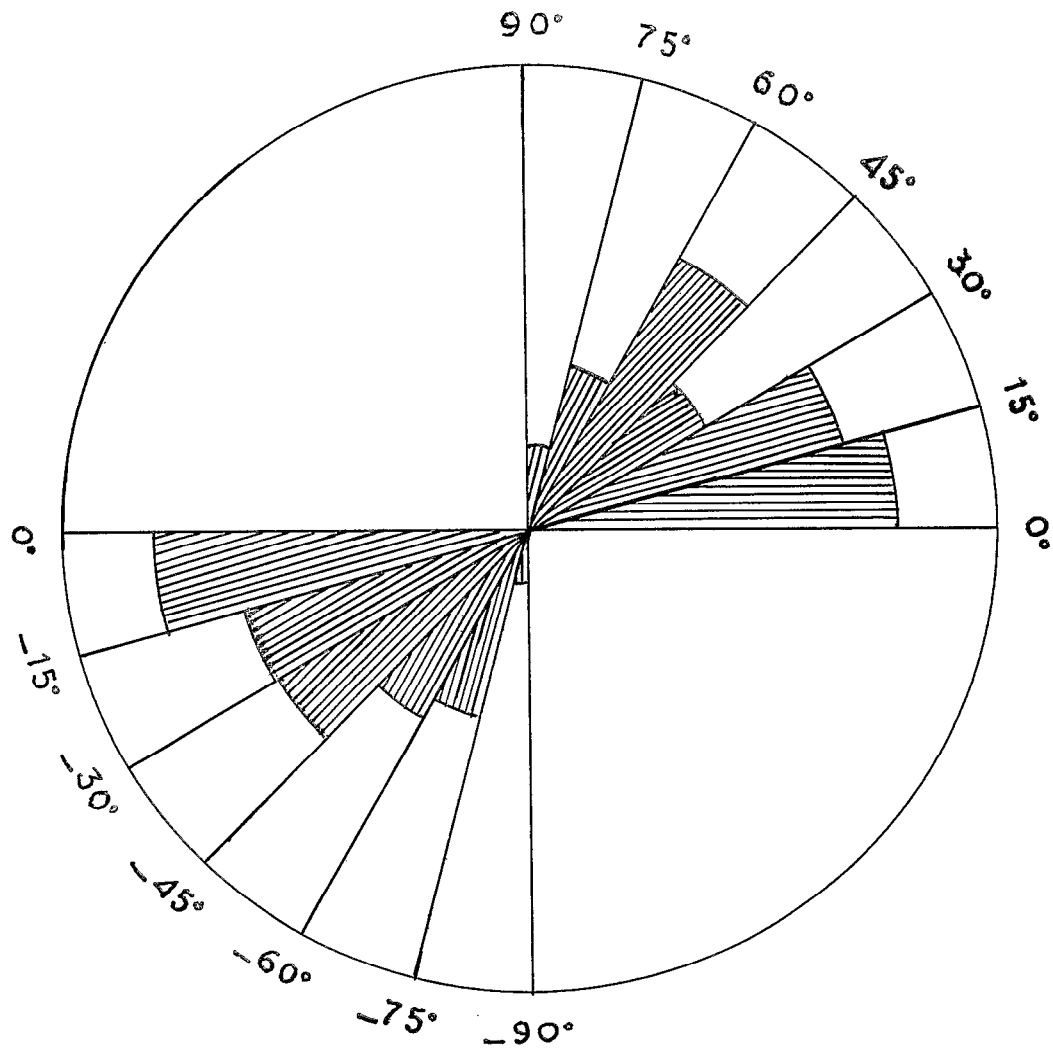
RÉPARTITION DES AZIMUTS DE M_{xy}



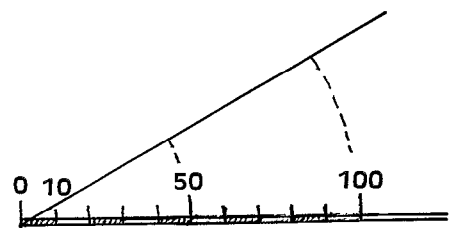
Nombre d'échantillons



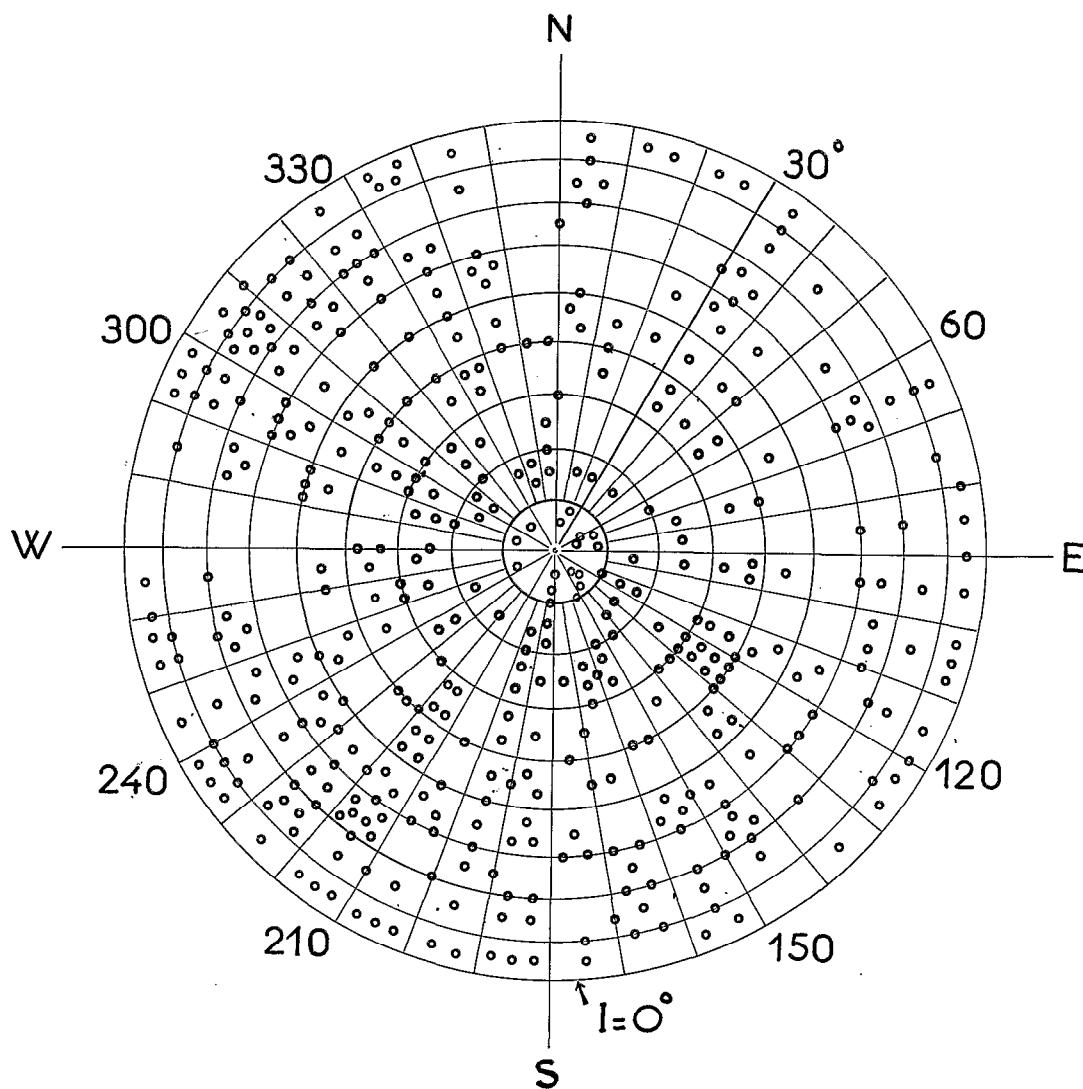
RÉPARTITION DES INCLINAISONS DE \vec{M}



Nombre d'échantillons

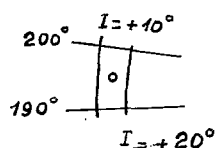


RÉPARTITION DES ÉCHANTILLONS à $I > 0$

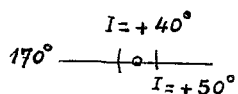


LÉGENDE

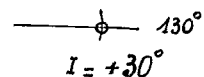
PROJECTION EQUIVALENTE DE LA SPHERE INDICATRICE
(HEMISPHERE NORD)



1 échantillon d'azimut de M_{xy}
compris entre 190° et 200° , et d'incli-
naison de \vec{M} comprise entre 10° et 20°

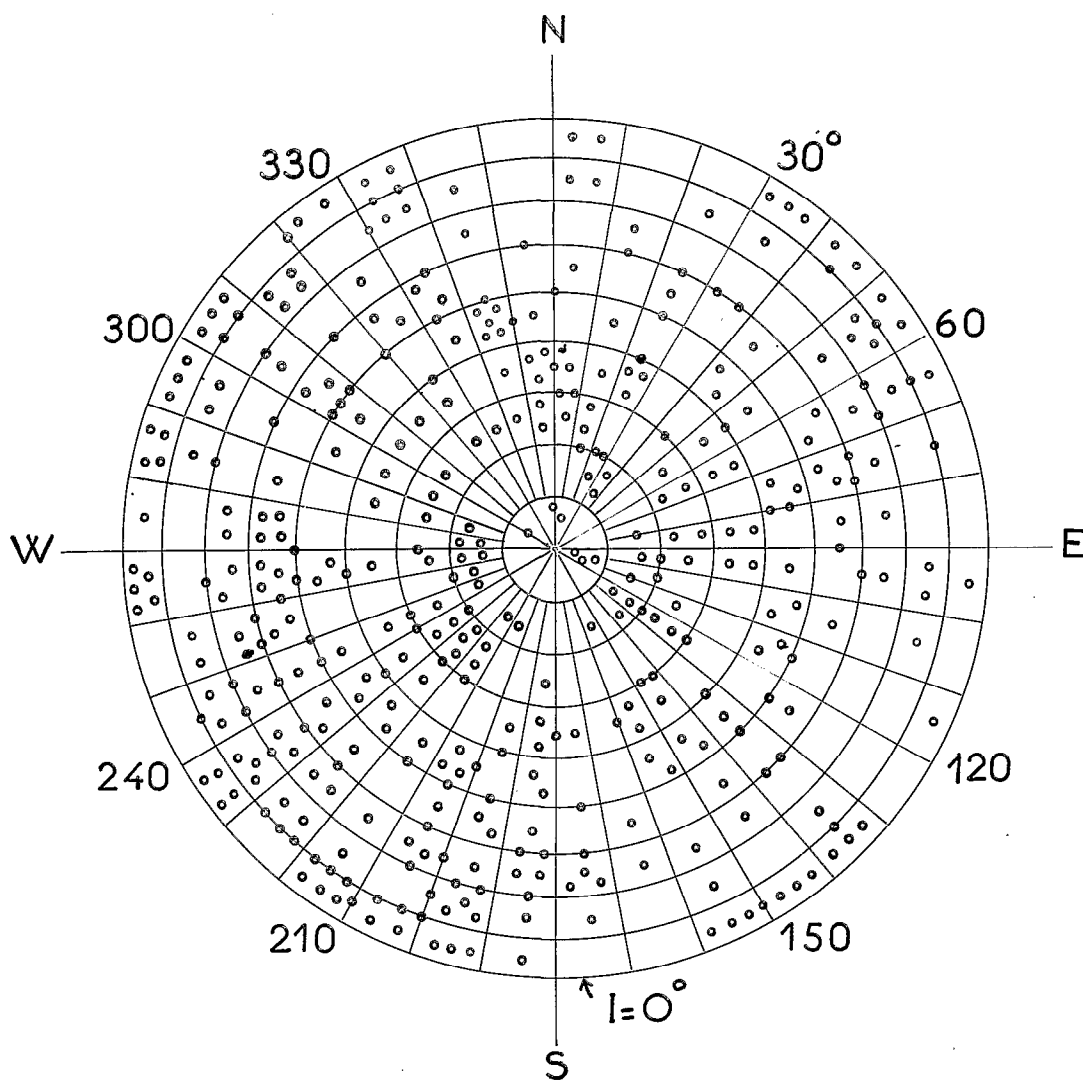


1 échantillon d'azimut de M_{xy}
égal à 170° , et d'inclinaison
de \vec{M} comprise entre 40° et 50°



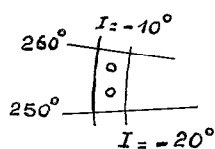
1 échantillon d'azimut de M_{xy}
égal à 130° , et d'inclinaison
de \vec{M} égale à 30°

RÉPARTITION DES ÉCHANTILLONS À $I < 0$

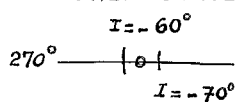


LÉGENDE

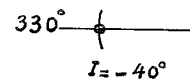
PROJECTION ÉQUIVALENTE DE LA SPHÈRE INDICATRICE
(HEMISPHERE SUD)



2 échantillons d'azimut de M_{xy}
compris entre 250° et 260°, et d'incli-
naison de \vec{M} comprise entre -10° et -20°



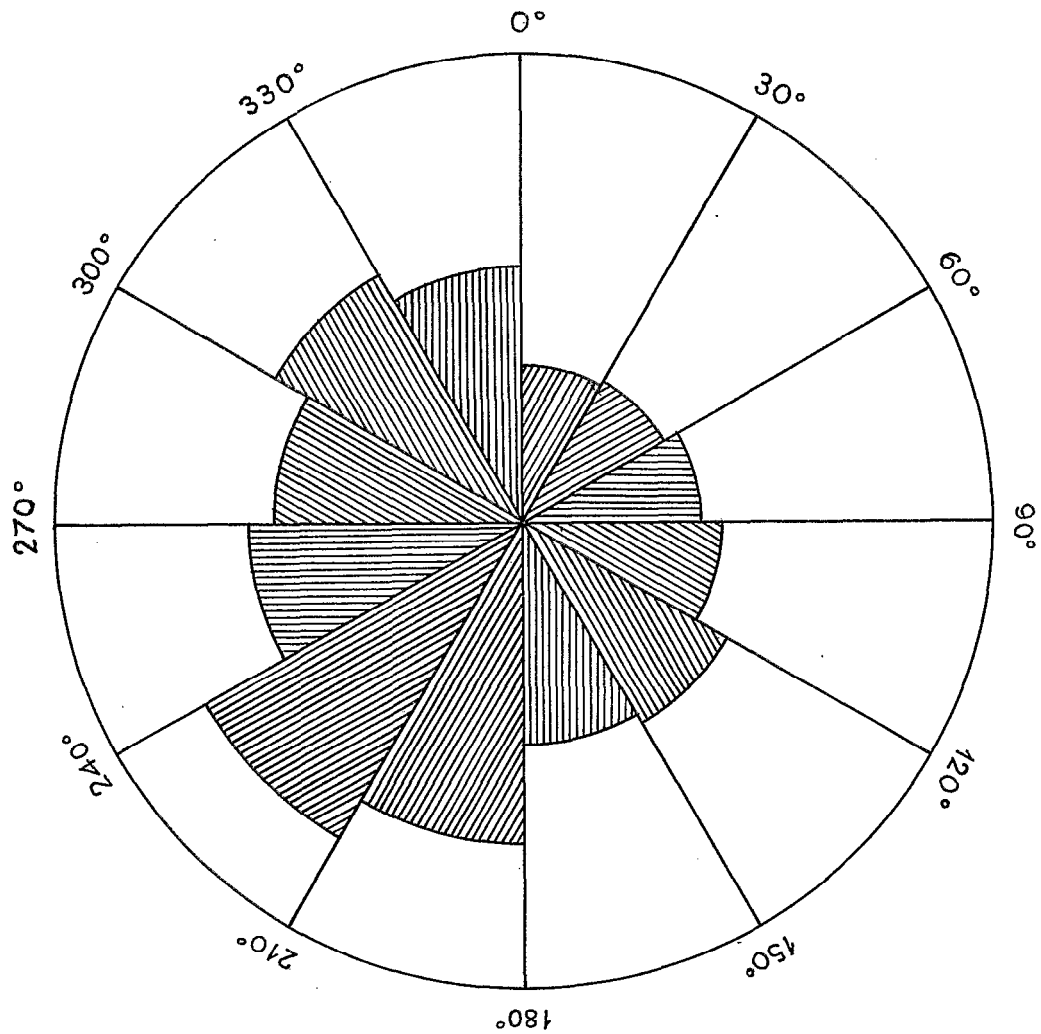
1 échantillon d'azimut de M_{xy}
égal à 270°, et d'inclinaison
de \vec{M} comprise entre -60° et -70°



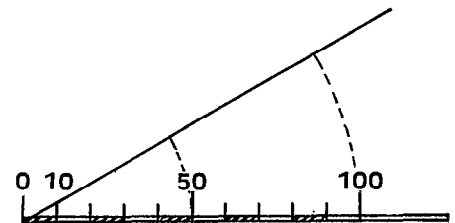
1 échantillon d'azimut de M_{xy}
égal à 330°, et d'inclinaison
de \vec{M} égale à -40°

DIRECTIONS PRIVILÉGIÉES de M_{xy}

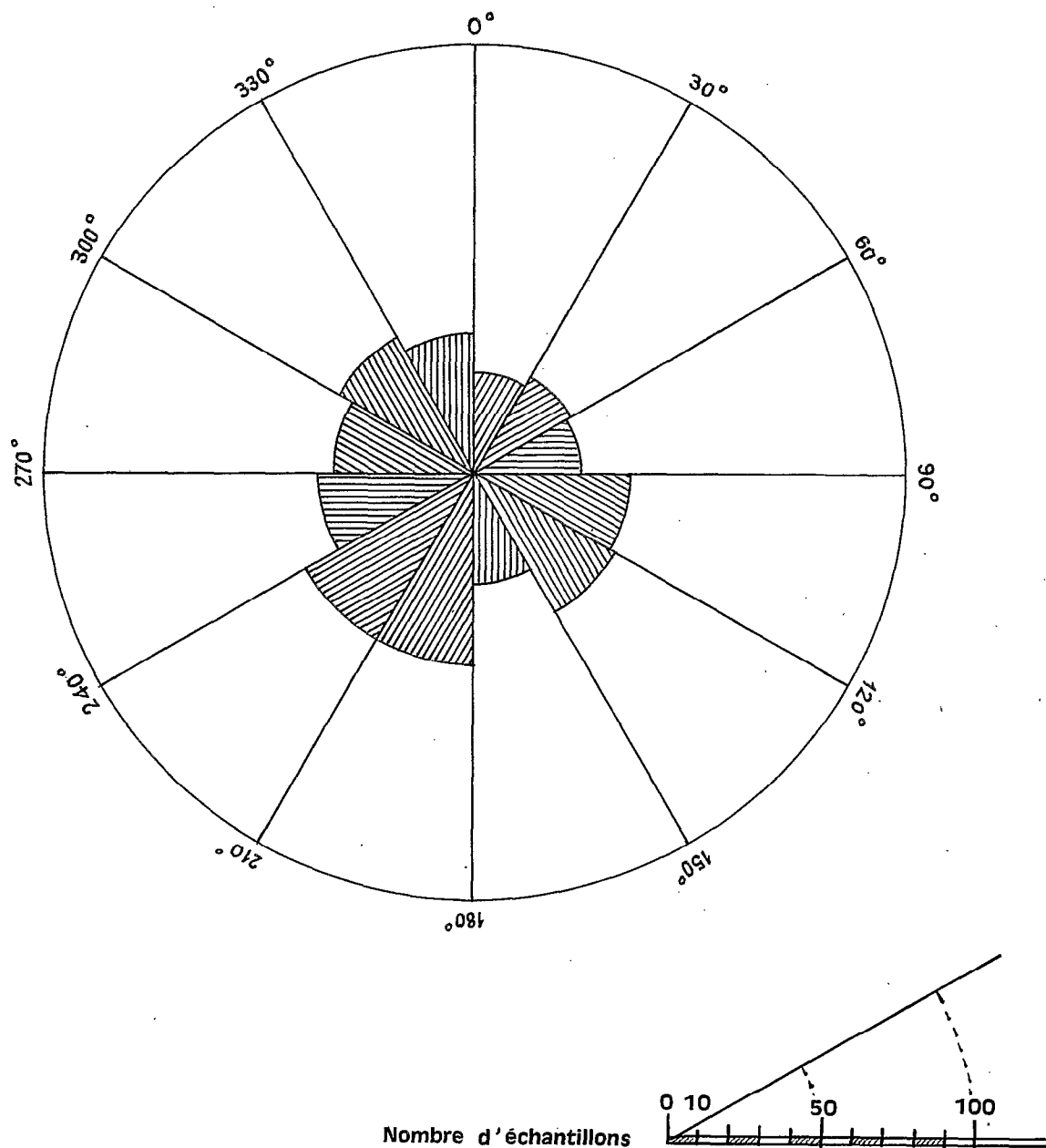
Totalité des échantillons

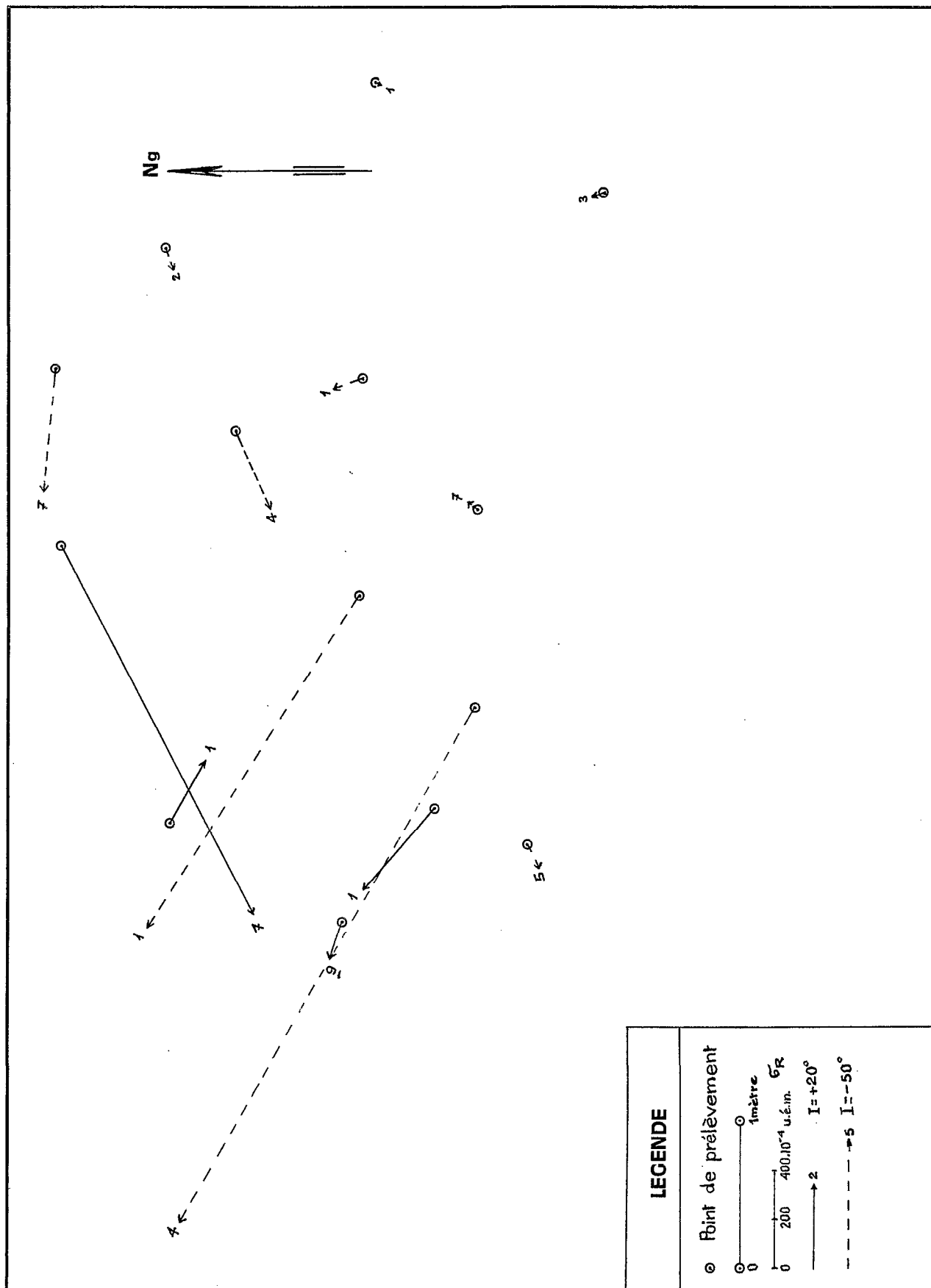


Nombre d'échantillons

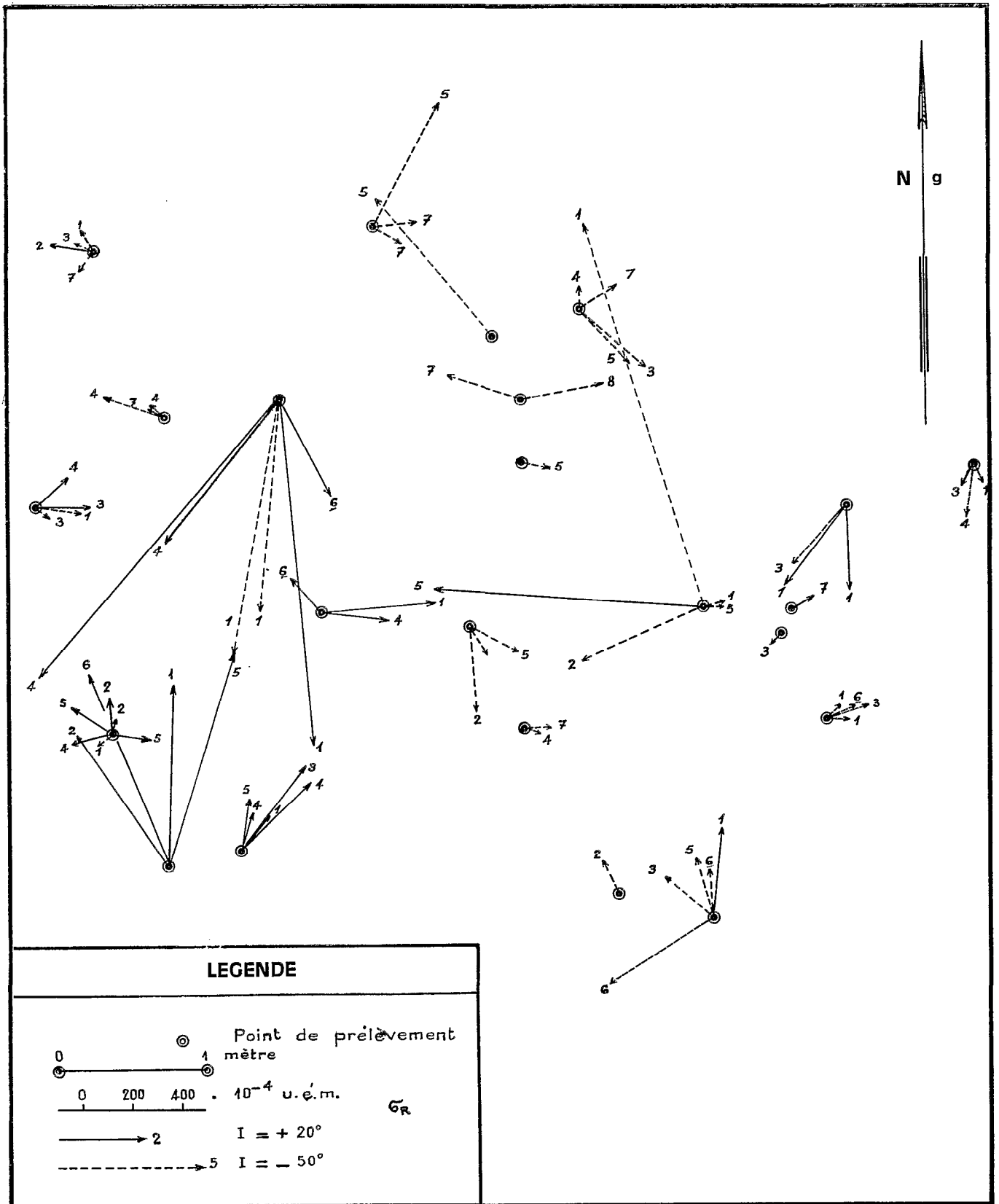


DIRECTIONS PRIVILÉGIÉES de M_{xy}
Échantillons à σ_R inférieurs à $300 \cdot 10^{-4}$ uém cgs

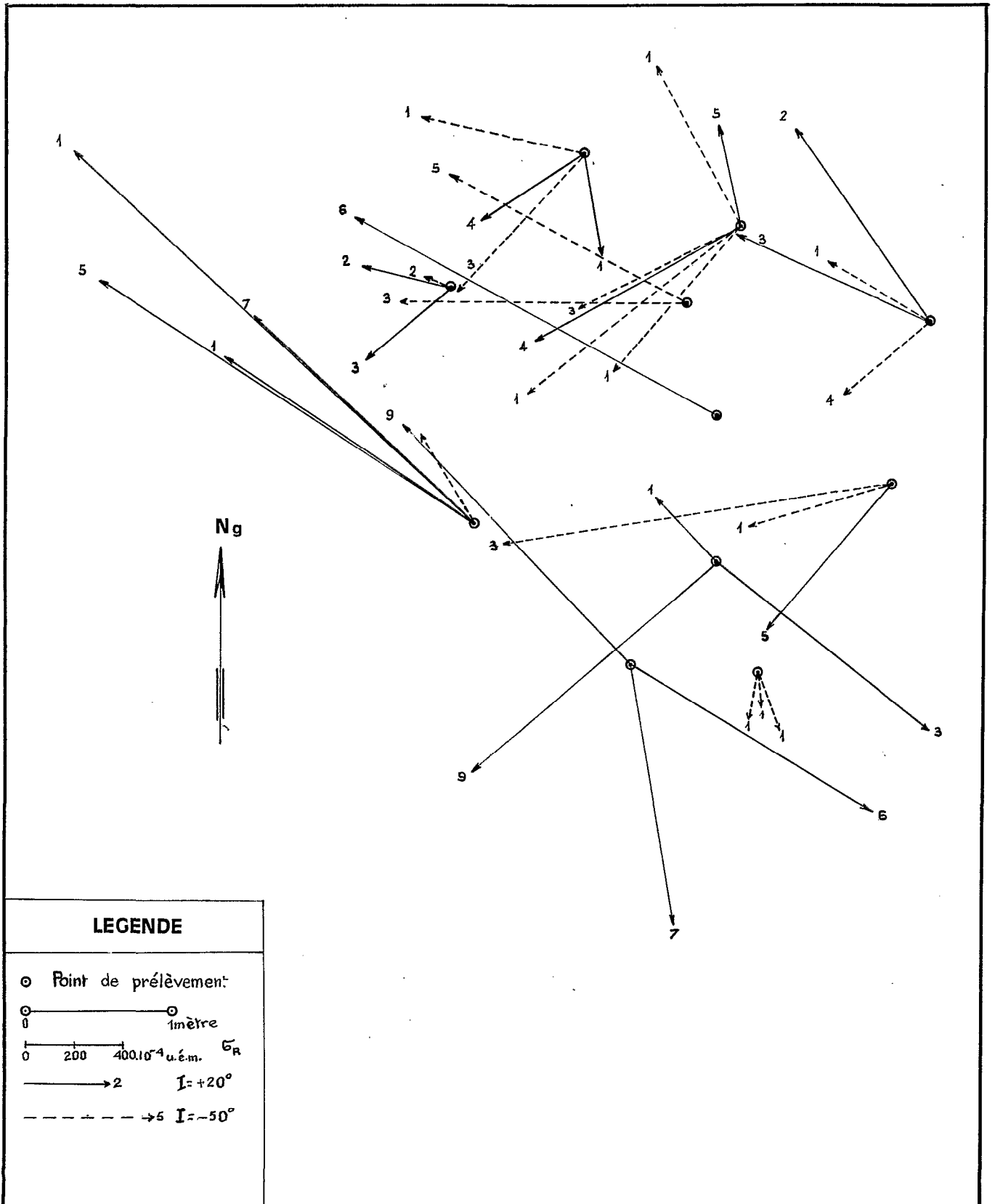




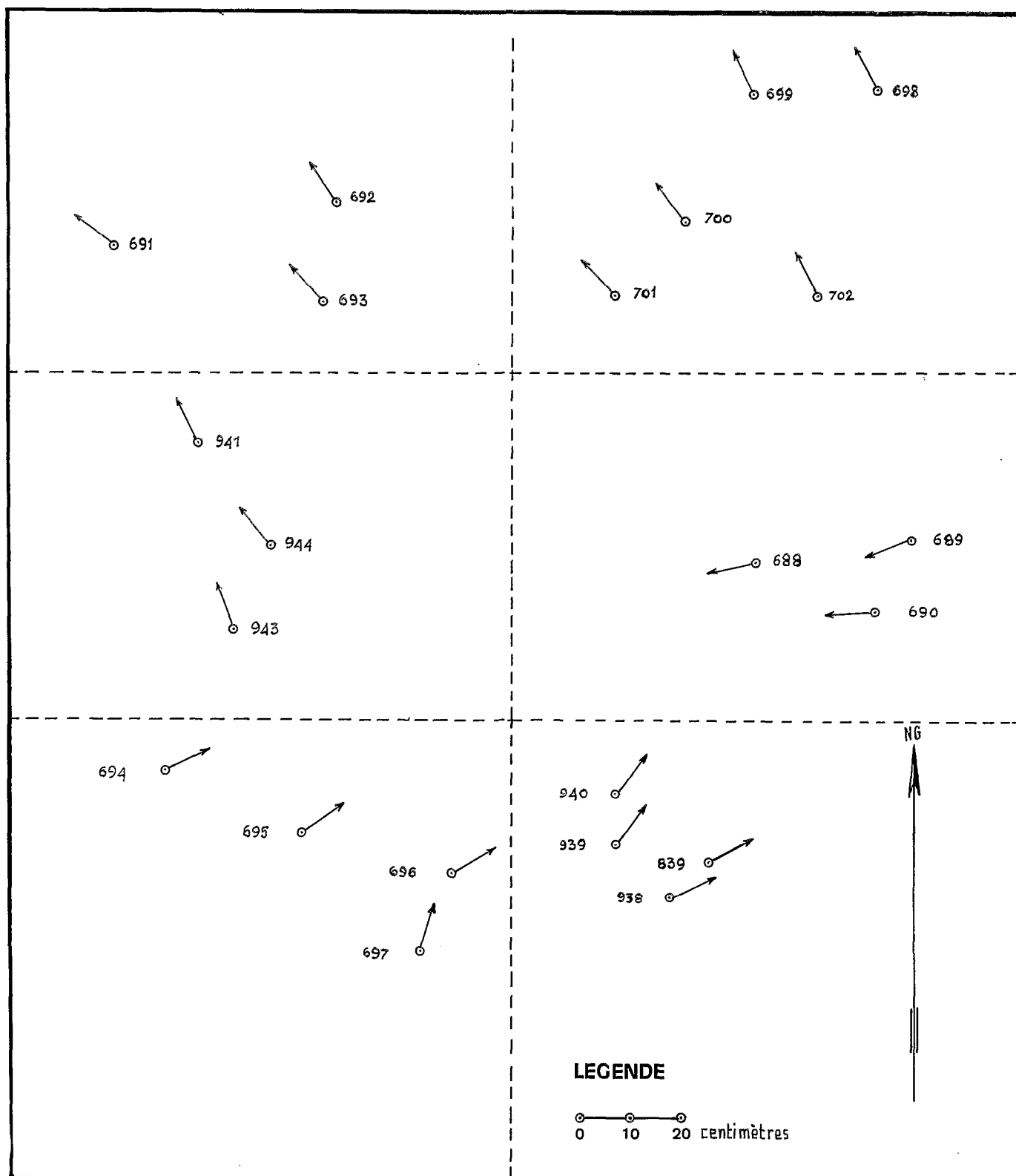
GRUPE N° 2



GRUPE N° 3

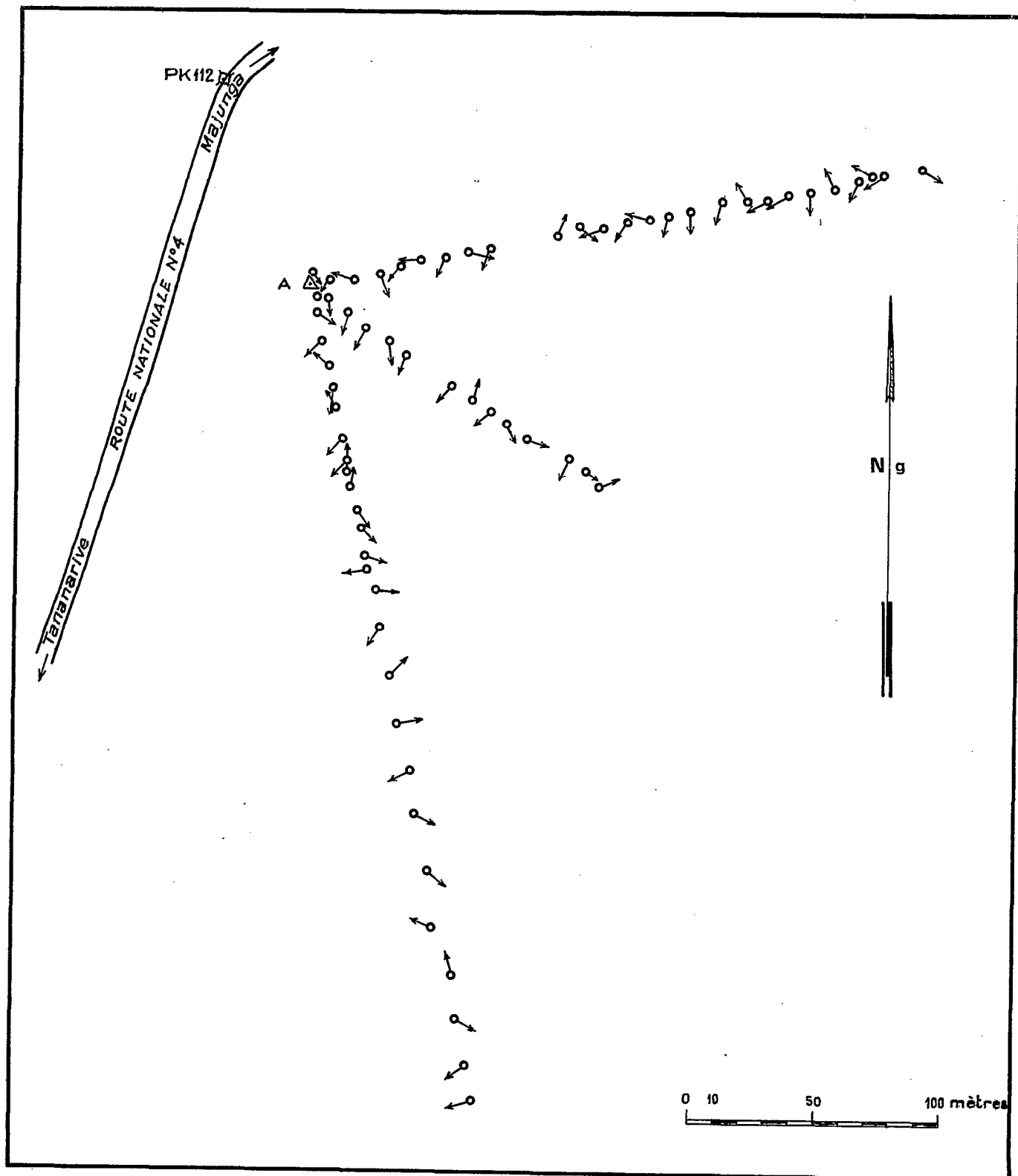


DIRECTION DE M_{xy}
Échantillons en profondeur (6 groupes)

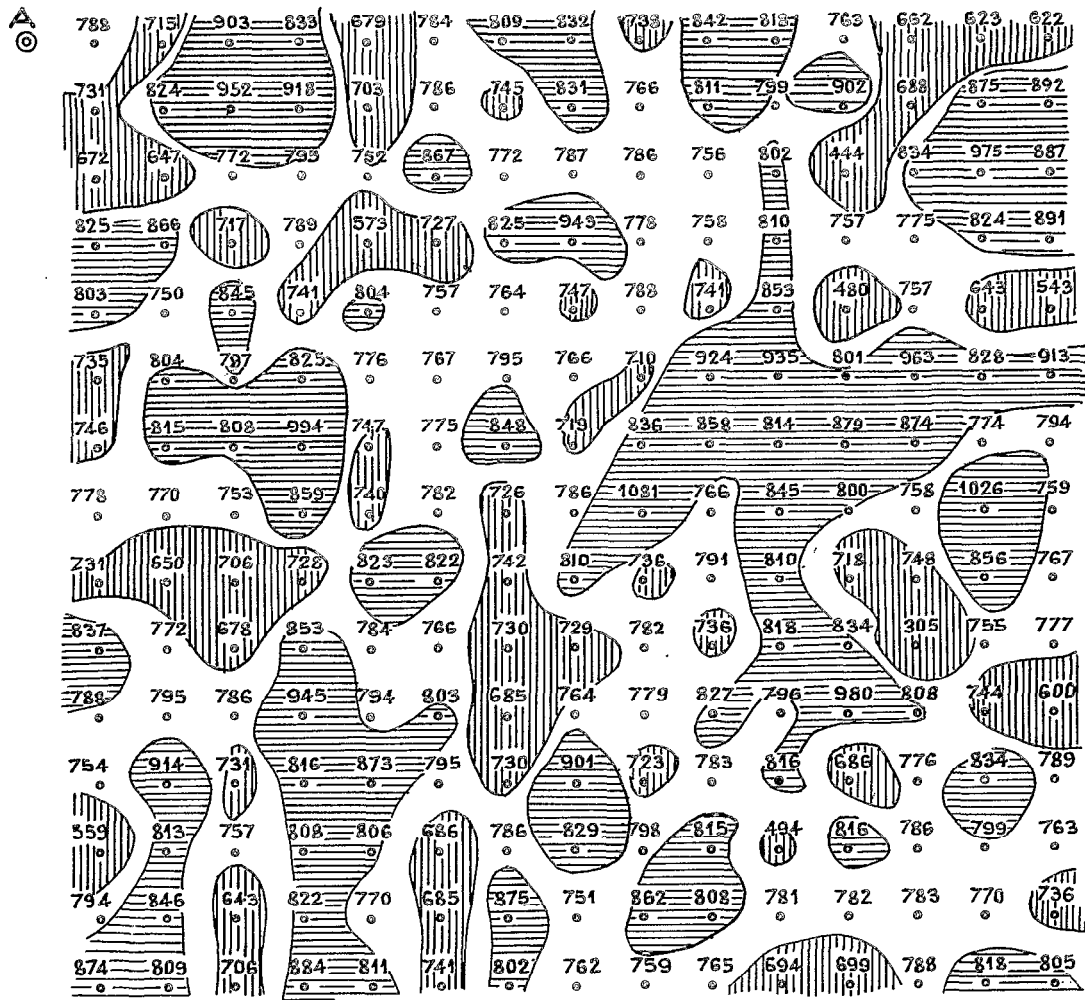


PROFILS N/S, E/W et NW/SE MAGNÉTIQUES

Direction moyenne de M_{xy}



ISODYNAMES DE Z



LEGENDE

o Station de z

788 $Z = -27.880$ gammac

0 10 20 mètres



$|Z| > 2,8 \cdot 10^5 \gamma$



$|Z| < 2,75 \cdot 10^5 \gamma$



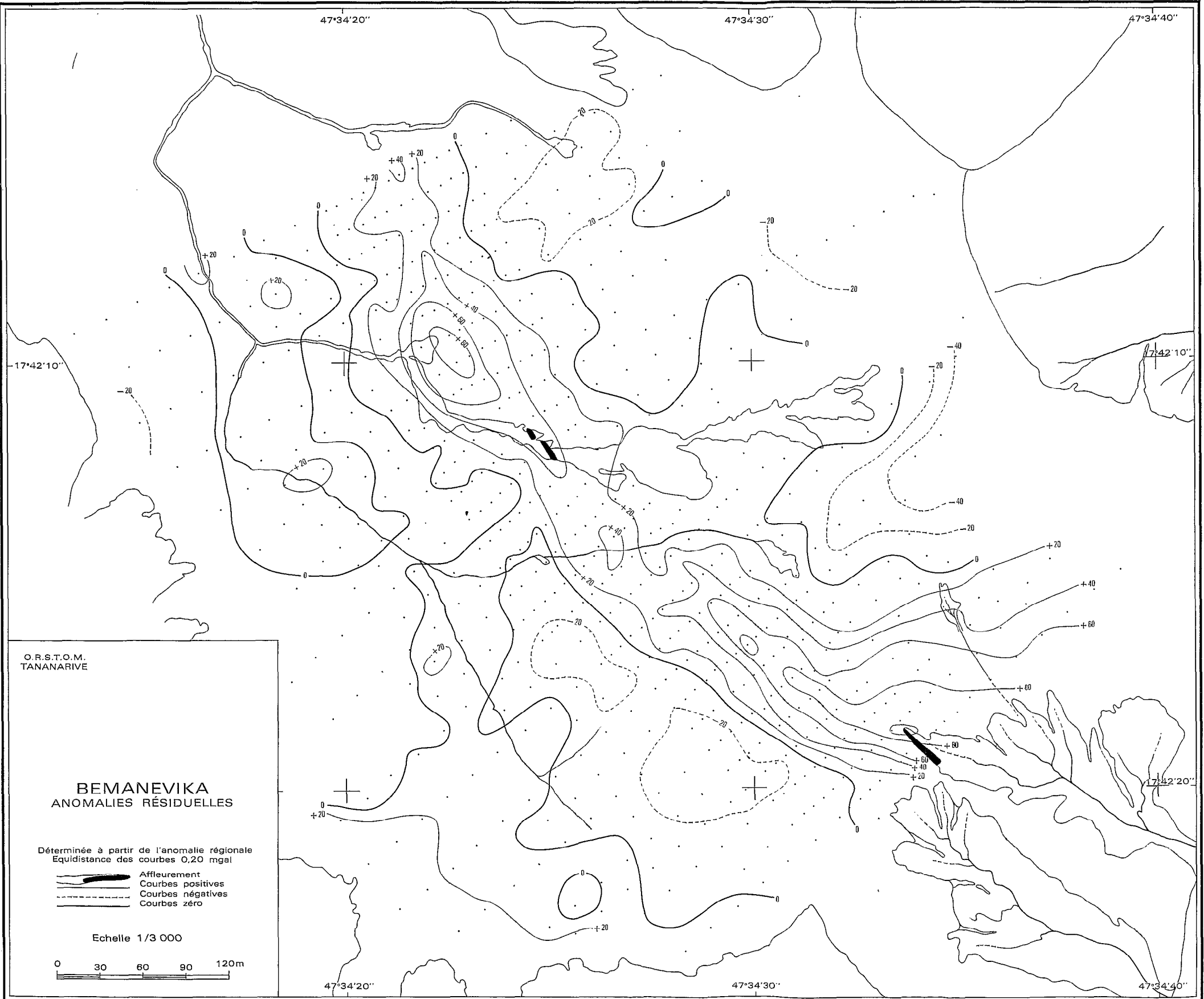
$2,75 \cdot 10^5 < |Z| < 2,8 \cdot 10^5 \gamma$

$\gamma = \text{gamma} = 10^{-5} \text{ oersted}$

Bibliographie

- (1) BESAIRIE (H.) — fin 1964 - *Contribution à l'étude des latérites malgaches à l'occasion du Colloque sur les latérites organisé par l'U.N.E.S.C.O.*, Tananarive.
- (2) BOOTH (E.H.) — *J. Proc. Roy. Soc. N. South Wales*, LXIX, p. 53 (1935).
- (3) HAGENGUTH (J.H.) — 1951 - *Compendium of Meteorology*. American Meteorological Society. Boston, Massachusetts, p. 136-143.
- (4) HEILAND (C.A.) — *Physics of the Earth*, p. 117.
- (5) HOTTIN (G.) — 1961 - *Travaux du Bureau géologique*, Service Géologique, Tananarive, p. 2.
- (6) LE BORGNE (E.) — avril-juin 1960 - Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol. *Annales de Géophysique*, tome 16, fasc. 2.
- (7) MAURAIN (C.) — *Physique du Globe*, 1923.
- (8) NAGATA (T.) — *Handbuch der Physik* 1966 - Geophysik III Teil I, p. 271.
- (9) RIMBERT (F.S.) — Thèse Univ. de Paris (1958).
- (10) ROCHE (A.) — Thèse Univ. de Paris (1953).
- (11) ROTHE (J.) — Thèse Univ. de Paris (1936).
- (12) SCHULZE, — *Zeit. f. Geophys.* VI, p. 151 (1930).
- (13) THELLIER (E.) — 1938 - *Annales de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris*, t. 16.



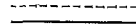





O.R.S.T.O.M.
TANANARIVE

BEMANEVIKA ANOMALIES RÉSIDUELLES

Déterminée à partir de l'anomalie régionale
Equidistance des courbes 0,20 mgal

-  Affleurement
-  Courbes positives
-  Courbes négatives
-  Courbes zéro

Echelle 1/3 000

